

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

水晶板を用いた弾性表面波素子の中心周波数とその温度特性

The Center Frequency and its Temperature Characteristics
of Saw- devices utilising Quartz Substrates.

箕輪 純一郎

十文字 弘道

J. Minowa

H. Jumonji

日本電信電話公社 横須賀電気通信研究所

Yokosuka E.C.L., N.T.T.

1. まえがき

弾性表面波素子は近年、小型・軽量かつ高性能・高信頼の素子として注目されて研究が進められ、一部実用化もなされつつある。しかしこの素子の適用領域をさらに拡張するには、(i)微細な周波数調整 (ii)良好な温度特性の確保などの重要な課題を解決する必要があると考える。

従来(i)については、絶縁膜とインターディジタル形トランスジューサ上に付加しその膜厚を適切に選ぶ方法⁽¹⁾、あるいは反射電極を設けてその電気的負荷を適切に調整する方法が検討され、(ii)については、基板半体が零温度係数をもつ材料あるいは切断角の探索⁽²⁾、層構造を利用した温度補償法⁽³⁾⁽⁴⁾などについて研究がなされている。

筆者等は、弾性表面波に対し常温付近で零温度係数をもつ実用的には唯一の基板である水晶STカット板(+2°45' 回転Y板, X軸伝搬)について、その異方性を利用すれば板面内における伝搬方向を修正することによって微細な周波数調整ができる着想を得た⁽⁵⁾⁽⁷⁾。したがって、この方法による周波数調整を行うには、面内回転角(伝搬方向のX軸からの偏り)と弾性表面波位相速度の関係と明らかにしなければならぬことは言うまでもないが、同時に周波数温度特性によえる伝搬方向の補正の影響を知る必要がある。もし、周波数微細調によっても、水晶STカット板の良好な温度特性がそのまま保存さ

れるならば(ii)の問題も一挙に同時に解決できると考えられる。

本報告は、このような観点にたち、トランスジューサを構成する電極金属膜の影響を含めた水晶STカット板近傍における表面波位相速度および周波数温度特性と切断角・面内回転角との関係について、理論的実験的に検討したものである。

その結果、微小な伝搬方向の修正によって、温度特性を損うことなく、周波数調整が可能であること、電極の負荷効果により位相速度の低下および周波数温度特性における頂点温度の低温側への移動がみこることなどが明らかにになり、素子の最適設計の見通しが得られた。

2. 解析モデル及び解析手法

2.1 解析モデル

図1に示すような水晶回転Y板について解析する。X, Y, Zはそれぞれ水晶の3個の軸であり、 θ はX軸のまわりに回転した角度、 φ は板表面内のX軸よりの回転角である。

一般に、弾性表面波素子は圧電基板表面に弾性表面波伝導と送受信する交差指形電極を形成して構成するものであるが、この素子の中心周波数 f は、交差指形電極の指間隔 l 及び電極の影響を含めた位相速度 v より

$$f = v/l \quad (1)$$

で定まり、また、その温度特性は l 及び v の温

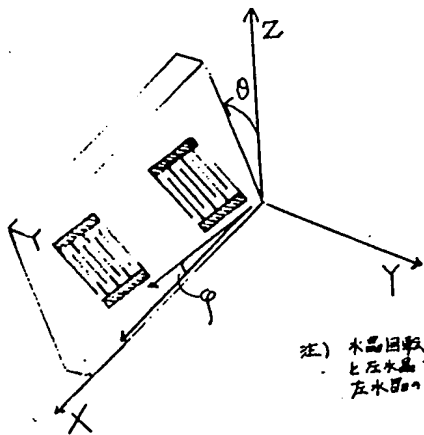


図1. 水晶の切削角および面内回転角

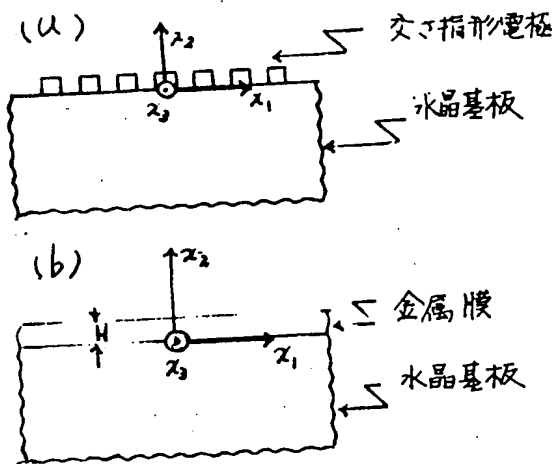


図2 解析モデル及び座標系

度係数で次のように表わされる。

$$\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} = \frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial T} - \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \quad (2)$$

したがって、圧電基板と同期構造を有する交差指形電極とみなされる素子の位相速度は、その温度特性を知る必要がある。ここでは解析を簡単にするため、図2(a)に示す交差指形電極と図2(b)に示すような、単位長質量が等しい等価的な一様金属膜で被覆された構造で近似し、解析を進めるものとする。

2.2 解析手法

図2(b)に示すように、水晶基板表面上に厚さHなる金属膜を考へ、空間座標軸を直交座標系 (x_1, x_2, x_3) に選び、弾性表面波の伝搬方向を x_1 、深さ方向を x_2 とする。

水晶基板内、金属膜内でそれぞれ独立の変位・電位を仮定し、各領域で運動の方程式及び圧電

の方程式を満足させ、かつ水晶基板、金属膜及び自由空間の境界面で成立する境界条件を同時に満たすような弾性表面波位相速度 v を求める手法とする。

いま、水晶基板内では変位・電位を次のように置く

$$u_i = A_i \exp(k\Omega x_2) \exp\{jk(x_1 - vt)\} \quad (3)$$

$$\phi = A_0 \exp(k\Omega x_2) \exp\{jk(x_1 - vt)\} \quad (4)$$

ここに A_i ($i=1, 2, 3$)、 A_0 は振幅定数、 k は位相定数、 Ω は深さ方向の減衰定数、 t は時間である。

金属膜内では、変位の y (電位は零)を仮定し、諸定数にプライム $'$ を $'$ とつけて表わす。

$$u'_i = A'_i \exp(k\Omega' x_2) \exp\{jk(x_1 - vt)\} \quad (5)$$

($i=1, 2, 3$)

境界条件は

$$u_i|_{x_2=0} = u'_i|_{x_2=0} \quad (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

$$T_{2j}|_{x_2=0} = T'_{2j}|_{x_2=0} \quad (j=1, 2, 3) \quad (7)$$

$$\phi|_{x_2=0} = 0 \quad (8)$$

$$T'_{2j}|_{x_2=H} = 0 \quad (j=1, 2, 3) \quad (9)$$

以上、各領域で仮定した変位・電位の式(3)~(5)をそれぞれの領域で運動の方程式、圧電の方程式を解し、かつ上記(6)~(9)に示す合計10個の境界条件を同時に満たすような解 v を求めることにする。

なお、ここで用いる弾性定数、質量はすべて温度 T の関数であり、したがって v は温度の関数として得られる。

3. 計算結果

金属としては、弾性表面波素子の電極としてよく用いられるアルミニウム(Al)、金(Au)をとりあげて数値計算を行った。ここに用いた金属の物理定数は、文献(8)、(9)に、水晶の物理定数は文献(10)によった。

水晶基板にAlおよびAuの電極膜を設けた構造を以下それぞれ“Al on Quartz”、“Au on Quartz”と呼ぶこととする。

3.1 位相速度

弾性表面波位相速度を以下 v_m 、 v_{gm} 、 v_{ohh} 、 v_{grh} なる記号で表現すが、前二者は基板が無限に薄く完全導体で被覆された場合の位相速度で、面内回転を行なわないとき(X軸

方向伝搬)および φ なる面内回転を施したとき
(x 軸方向より φ なる角度に伝搬)のもの、後
二者は規格化膜厚 kH の定極で被覆された場合
の位相速度で、面内回転を打たないとき及び
 φ なる面内回転を施したときのものである。

温度 25°C における位相速度 $V_{\varphi m}$ の面内
回転角 φ 依存性を、切断角 θ をパラメータに、
図3に示す。この結果より、 $V_{\varphi m}$ は近似的に φ
の2次関数で示すことができる、

$$V_{\varphi m} = V_{0m} (1 + 6 \times 10^{-5} \times |\varphi|^2), \quad (10)$$

と表現できる。

つぎに、温度 25°C における位相速度 $V_{\theta KH}$
と規格化された膜厚 kH (ただし $k = 2\pi/\lambda$,
 λ :表面波波長)との関係と“Al on Quartz”
“Au on Quartz”について、数種の切断
角 θ をパラメータに図4に示す。また、 $V_{\theta KH}$
と kH との関係を数種の面内回転角 φ をパラメ
ータに図5に示す。当然のことながら $V_{\theta KH}$ の
 $kH = 0.0$ での値は $V_{\varphi m}$ と一致している。

これらの結果を考察する。 $V_{\theta KH}$ について
“Al on Quartz”, “Au on Quartz”
とを比較すると、両者ともに膜厚が増えるに
伴い、 $V_{\theta KH}$ はほぼ直線的に低下すること、そ
してその低下量は後者において著しく大きく、
約90倍であることがわかる。また、それぞれ
において切断角 θ が異なるとも $V_{\theta KH}$ の低下量は
同一(異なる θ に対し互に平行な曲線)である
ことがわかる。さらに、図5より $V_{\theta KH}$ と kH
の関係は、 θ を φ と読みかえることで上述の議
論をそのまま当てはめることができる。いま、
これらの結果を直線近似の式で表現すると、
先に述べた V_{0m} , $V_{\varphi m}$ と次の関係にあるこ
とがわかる。

$$V_{\theta KH} = V_{0m} (1 - \xi \times [kH]), \quad (11)$$

$$V_{\varphi KH} = V_{\varphi m} (1 - \xi \times [kH]), \quad (12)$$

ただし定数 ξ は、“Al on Quartz”では
約0.013 (近似範囲 $0 \leq kH \leq 0.06$),
“Au on Quartz”では約1.14 (近似
範囲 $0 \leq kH \leq 0.08$)である。

3.2 ビームステアリング角

ビームステアリング角 δ は、群速度方向(エ
ネルギーフロー方向)と位相速度方向(波面法線
方向)とのなす角であって、見掛け伝搬損失と
なって現れる。面内回転を施す(x 軸伝搬の

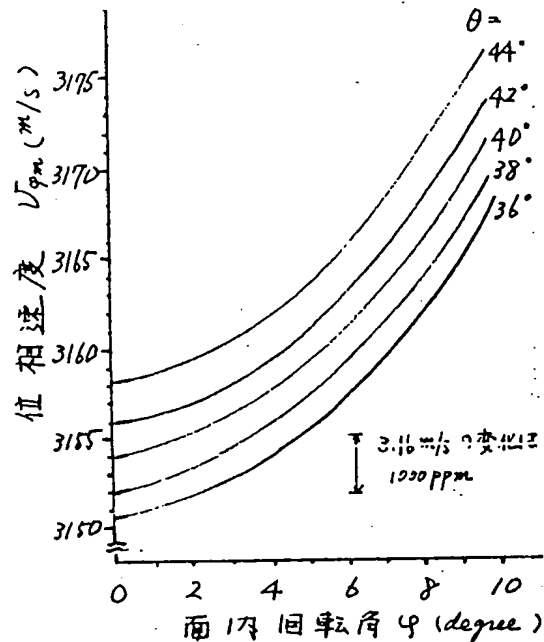


図3. 弾性表面波位相速度の面内回転角依存性

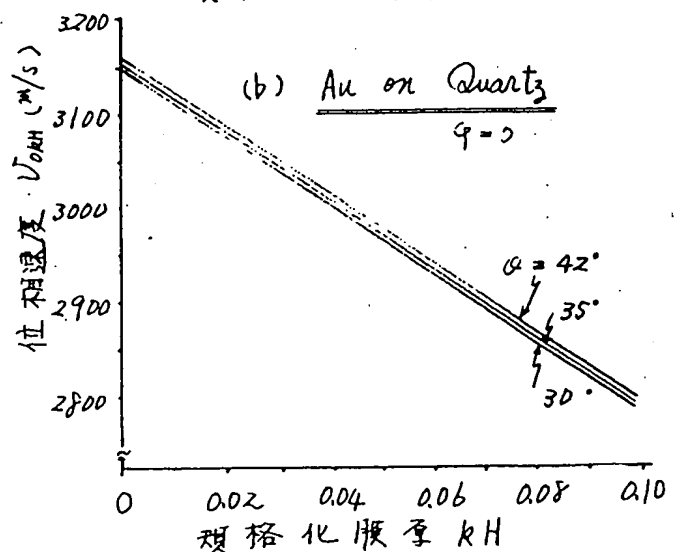
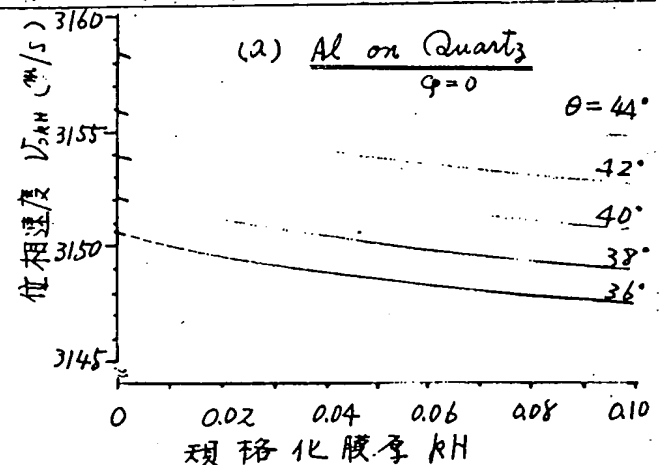


図4. 弾性表面波位相速度の膜厚依存性

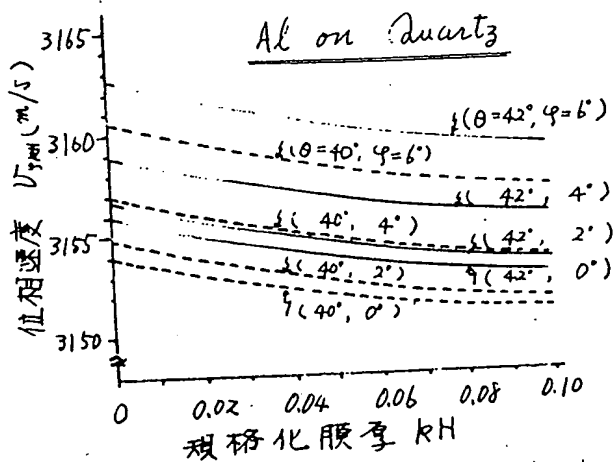


図5. 弾性表面波位相速度の膜厚依存性

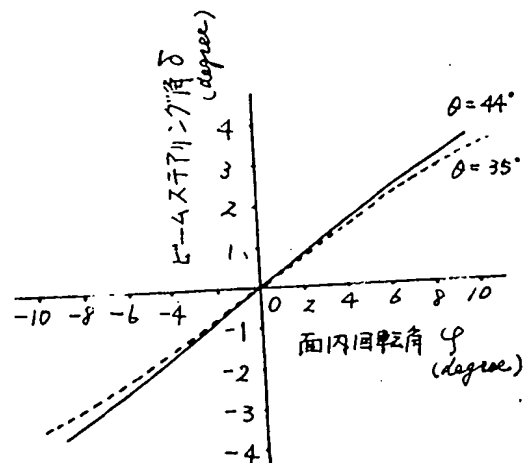


図6. ビームステアリング角の面内回転角依存性

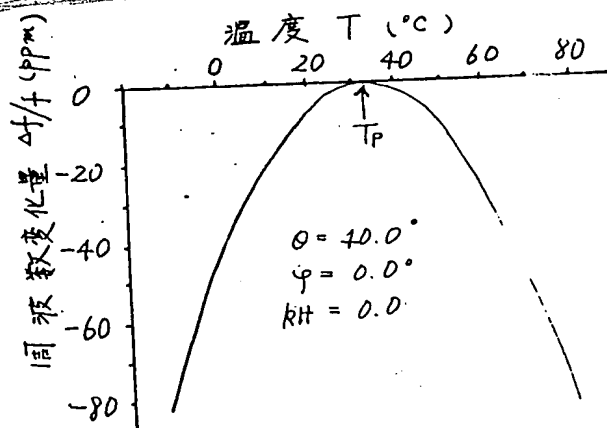


図7. 同波数温度特性の一例

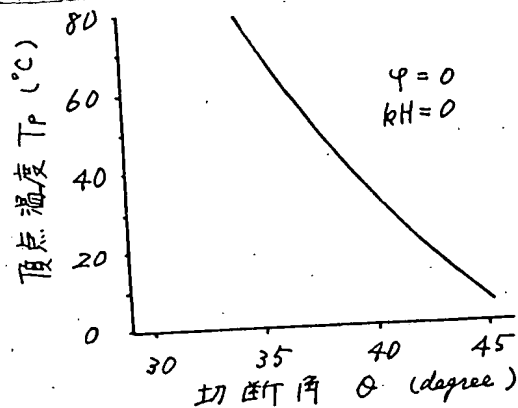


図8. 頂点温度 T_p の切断角依存性

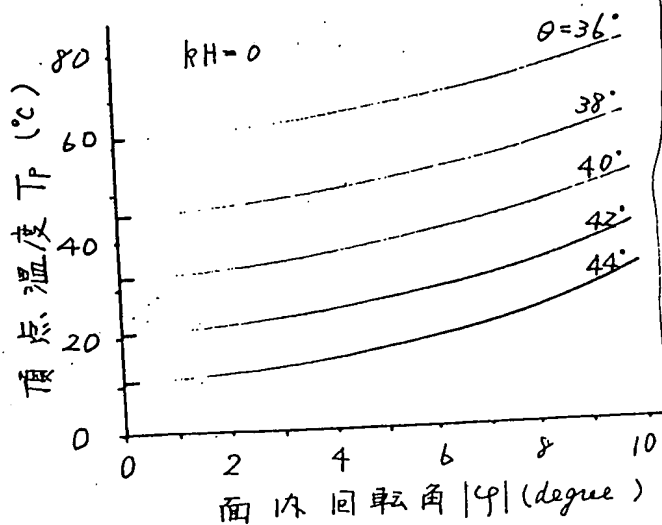


図9. 頂点温度 T_p の面内回転角依存性

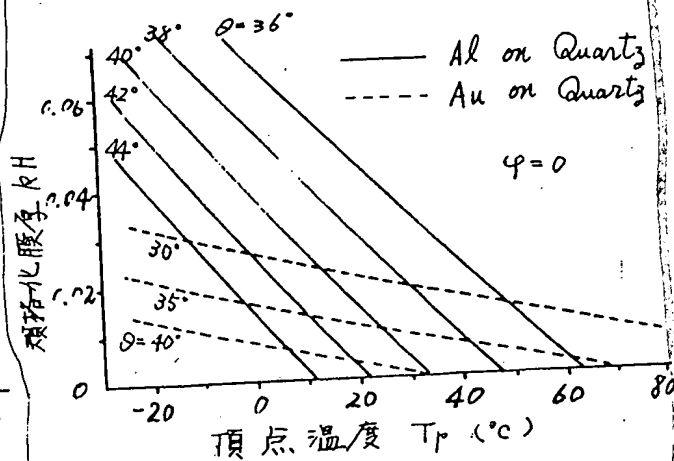


図10. 頂点温度 T_p の膜厚依存性

場合は $\delta = 0$) とヒームステアリング損失が生じ、その大きさは電極の幾何学的形状に依存する。ここでは、どう目安としてのヒームステアリング角 δ の面内回転角 φ 依存性を電極膜厚を無視した場合について図6に示す。

切断角 θ が $35 \sim 44^\circ$ の範囲では近似的に次のように示すことができる。

$$\delta = 0.37 \varphi \quad (13)$$

なお、電極膜厚を考慮した場合も式(13)と大差はない。

3.3 同波数温度特性

同波数温度特性への切断角 θ 、面内回転角 φ 、及び金属の膜厚 kH の影響について記述するが、本解析でとりあげた θ 、 φ 、 kH の範囲内では、温度 T による同波数変化量 $\Delta f/f$ は、図7に1例として示した2次曲線(温度変化が約 $\pm 75^\circ\text{C}$ で同波数変化量は -10 ppm)で示され、大幅な変化はない。しかし、図7の中に示した頂点温度 T_p が、上記パラメータ θ 、 φ 、 kH によって変化するのを、以下これに着目して記述する。

図8及び図9は、 $kH = 0$ の条件における頂点温度 T_p の切断角 θ 依存性及び面内回転角 φ 依存性を示したものである。 T_p は θ の増大に対して低下し、 φ に関してやや増大する。

図10は、電極金属膜がある場合において、数種の切断角 θ をパラメータに T_p と kH の関係を示したものである。 kH の増大とともに T_p はほぼ直線的に低温側に移動し、その移動量は、"Al on Quartz" では kH が 0.01 の増大に対し -8°C 、"Au on Quartz" では kH が 0.01 の増大に対し -40°C である。後者は前者に比較して著しく大きいことがわかる。

図11は、同じく電極金属膜がある場合において、頂点温度 T_p の面内回転角 φ 依存性を "Al on Quartz" について示したものである。面内回転を施しても面内回転を施さない場合(曲線1, 5)の膜厚依存性と変化なく、 φ の増大に対し全体として高温側に平行移動するにすぎないことがわかる。このことから、図11に示したパラメータ以外の場合も、図9, 10を用いて頂点温度 T_p の挙動を知ることもできる。

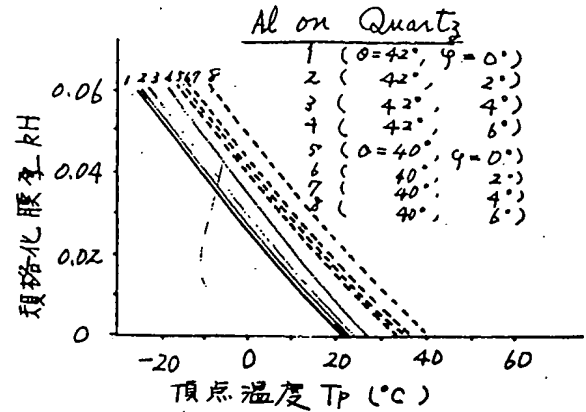


図11 頂点温度 T_p の膜厚依存性

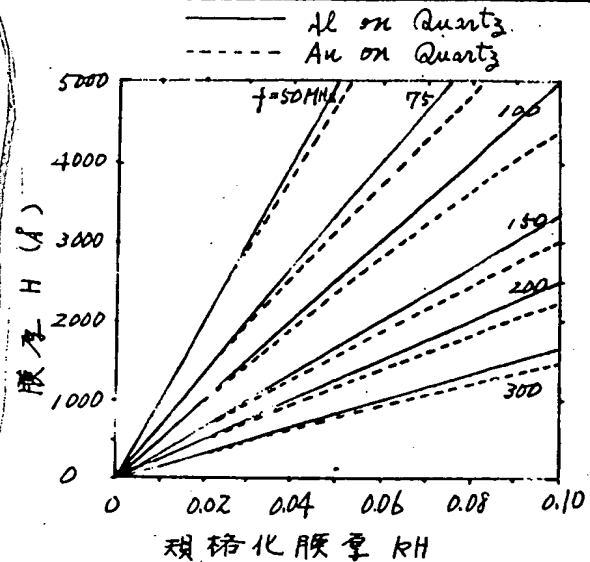


図12 規格化膜厚 kH と実際の膜厚 H との関係

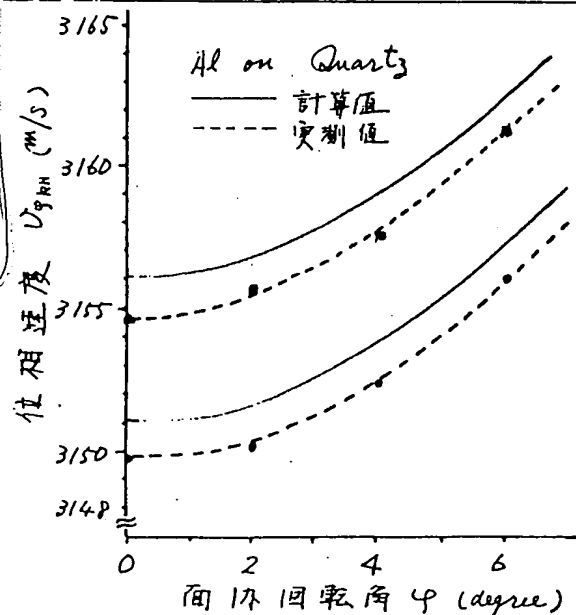


図13 弾性表面波位相速度の面内回転角依存性(実測値との比較)

以上の解析において、金属電極膜厚として、規格化した膜厚 kH を用いたが、この kH は、長さのディメンションをもつ実際の膜厚 H と同波数 f 、位相速度 v とで、次のように表わすことができる。

$$kH = (2\pi \cdot H \cdot f) / v \quad (14)$$

この関係を利用して、周波数 f (MHz) とパラメータに kH と H (Å: オングストローム) との関係を示めると図12のようになる。この図から両者の間の換算ができる。

4. 実験結果

計算結果を検証するため、“Al on Quartz”により、中心周波数 150 MHz帯のフィルタを構成し、位相速度、同波数温度特性の実測を行った。交差指形電極は、正交形の3-トランスジューサ方式¹⁾電極1周期長 20.56 μm (電極指幅 5.14 μm , ライン・スペース比約 1:1), 全電極指対数 1000 対のものである。

4.1 位相速度

位相速度は、得られたフィルタの同波数特性より求めた中心周波数と電極指周期長より、式(1)の関係を利用して求めた。

まず、得られた位相速度と面内回転角 φ との関係と計算値と合せて図13に示す。ここに、Al電極膜厚は 1000 Å一定、水晶の切断角 θ は $37^\circ 30'$, $42^\circ 45'$ の試料で、面内回転角 φ を 0, 2, 4, 6° と変えて行ったものである。

つぎに、位相速度とAl電極膜厚との関係と計算値と合せて図14に示す。ここにAl電極膜厚は 1000, 2000, 3000 Å, 水晶の切断角 θ は同じ $37^\circ 30'$ の試料で行ったものである。

これらの実験結果と計算結果と比較する。まず、面内回転角依存性については、両者に絶対値として 1.4 m/s の差はあるが、それからの偏差は ± 60 ppm の範囲で一致する(図13参照)。つぎに、膜厚依存性については、 kH

(*) 交差指形電極指のライン・スペース比はほぼ 1:1 でできているので、この等価的な膜厚は、実際の膜厚の $1/2$ として計算値との比較を行った。

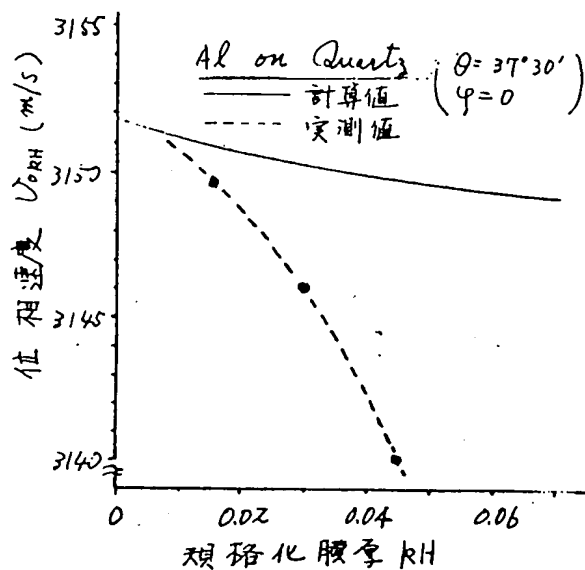


図14 弾性表面波位相速度の膜厚依存性 (実測値との比較)

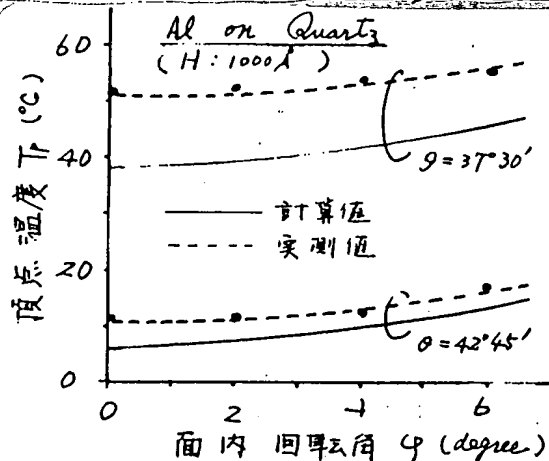


図15 頂点温度 T_p の面内回転角依存性 (実測値との比較)

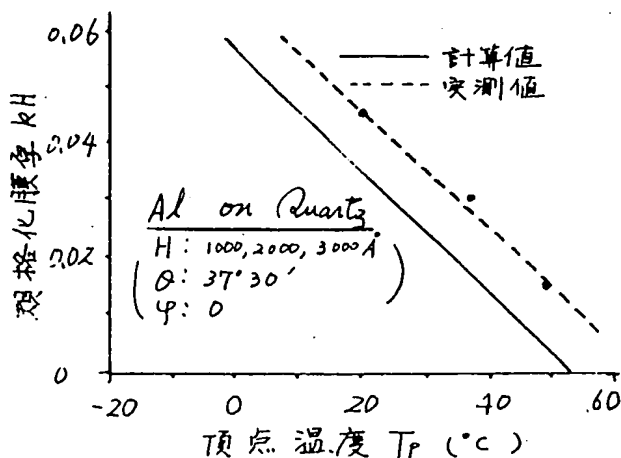


図16 頂点温度の膜厚依存性 (実測値との比較)

増大につれ両者の間に入隅な差が生じ、 $KH=0.03$ で約1000 ppmの値となる。これは、変形指形電極等価的性質をもつ一種金属膜で解析したことに起因するものと考えられ、今後検討課題である。

4.2 周波数温度特性

上記位相速度の測定に用いた同一試料によって、周波数温度特性の実測を行い、計算値との比較を行った。その結果、すべての試料について、図7の計算値と頂点温度 T_p の位置を除いてほぼ等しい2次曲線で得られた。そこで、頂点温度 T_p のみに着目して、金属膜厚、切断角、面内回転角依存性を整理し、計算結果と比較すると図15、16々ようになる。

この結果、実測値は計算結果とは、絶対値で5~10°Cの差はあるが、その傾向はよく一致していることがわかる。なお、絶対値の差は解析に用いた物理定数に起因するものと考えられる。

5. あとがき

弾性表面波素子の周波数微調整法を確立するため、実用上有用な水晶STカット板近傍における弾性表面波位相速度および周波数温度特性と切断角・面内回転角および電極金属膜厚との関係について、理論的・実験的に検討した結果次のような点が明らかになった。

(1)切断角が36°~44°の範囲内で、伝搬方向(面内回転角)を±4°程度変化させた場合、弾性表面波位相速度は±1000 ppm変化することがわかった。したがって、この角度範囲で約±1000 ppmの周波数調整量を得ることができ。

(2)伝搬方向の修正によって生ずるビーグステアリングの角度は、上記角度範囲で2°以内の比較的小さな値である。

(3)伝搬方向の修正によっても周波数温度特性(2次曲線)の頂点温度の変化は、上記角度範囲でたかだか3°C以内の小さな値である。

(4)トランスジューサを構成する電極金属膜の周波数低下に及ぼす影響は、Alの場合は小さいが、Auの場合はAlの約90倍で著しく大きい。

(5)上記金属膜の頂点温度に及ぼす影響は、膜厚増大に伴いほぼ直線的に低温側に移動させる効果をもつ、"Au on Quartz"では著しく大きい。

(6)中心周波数を設定する除重厚な位相速度や周波数温度特性について、理論値と実測値と比較した結果、実用上の規格化膜厚および面内回転角の範囲では良好な一致が得られた。

以上の結果から良好な温度特性を確保したまま、周波数微調整を行うことが明らかになり、合せて結晶の切断角、面内回転角ならびに電極金属膜の影響等を考慮した最適設計の見通しが得られた。

謝 辞

日頃御指導いただく重井基幹伝送研究部長、吉川茅二研究室長、田中有線伝送研究室長、プログラム作成において御教唆いただいた中川山梨大学助教授、有線伝送研究室の皆様には感謝する。また試料作成・測定に際して御協力いただいた阿部社員、森川社員に礼申し上げる。

文 献

- (1)西川；"弾性表面波フィルタ"、実録 昭47-18318
- (2)卜部、石原；"弾性表面波フィルタ用反射電極の実験的検討"、日本音響学会講演論文集 2-3-10, 1975年5月
- (3)M. B. Shultz et. al.; "Temperature Dependence of Surface Acoustic Wave Velocity on α Quartz", T.A.P., Vol. 41, No. 7, 1970
- (4)T. E. Parker et. al.; "Temperature Stable Materials for S.A.W. Devices", Proc. 29th Ann., F.C.S., p143, 1975
- (5)寺崎、清水；"金属膜厚を考慮した弾性表面波の温度特性"、信学会超音波研鑽 US 75-35, 1975年12月
- (6)箕輪、吉川；"弾性表面波装置の製法" 特願 昭50-97772
- (7)箕輪、十文字；"水晶STカット板を利用した弾性表面波素子の中心周波数特性とその温度特性"、EMI機能部品研鑽 1976年2月

- (8) P. M. Sutton ; "The variation of the Elastic Constants of Crystalline Aluminium with Temperature between 63°K and 773°K" *Physical review*, Vol. 91, NO. 4 pp. 816~821 August, 1953
- (9) J. R. Neighbours et. al. ; "Elastic Constants of Silver and Gold", *Physical review*, Vol. 111, NO. 3, pp. 707~712 August, 1958
- (10) R. Beckmann et. al. ; "Higher-Order Temperature Coefficients of the Elastic Stiffnesses and Compliances of Alpha-Quartz", *Proc. IEEE*, Vol. 50 pp. 1812~1822, August, 1962
- (11) 小山田, 箕輪, 石原 ; "スリ-トランスジューサー形弾性表面波フィルタ", 日本音響学会講演論文集 3-4-2, 1973年 5月
- (12) 箕輪, 吉川 ; "弾性表面波超狭帯域フィルタの検討", 日本音響学会講演論文集 2-2-14 1975年 10月

The Center Frequency and its Temperature Characteristics of Saw-devices utilizing Quartz Substrates.

1. Preface

Recently, saw-devices have been getting an attention as devices of small and light, and high performance and high reliability, its research has been promoted, and some results are put in use for some practical applications. However, to expand the application area of this device, the authors think that some important issues, such as (i) fine adjustment of frequency, (ii) maintaining good temperature characteristic, should be solved.

Traditionally, a method of selecting a suitable film thickness by putting an insulation film on an inter-digital type transducer, or a method of adjusting the electric load suitably by providing a reflective electrode have been evaluated for the above case (i), and a temperature compensation method using a material having cold temperature coefficient as a single substrate, search of cutting angle, or a layer structure, have been studied for the above case (ii).

As for the crystal ST cut plate ($+2^\circ 45'$, rotate Y plate, X-axis propagation), which is an only practical application having a cold temperature coefficient with respect to SAW (Surface Acoustic Wave) at room temperature, the authors have found an idea that can conduct a fine adjustment of frequency by correcting propagation direction in a substrate by using anisotropy of the crystal ST cut plate. Therefore, for the fine adjustment of frequency with this method, it is needless to say that the relationship between the in-plane rotation angle (a bias with respect to the X-axis of the propagation direction) and the phase speed of SAW should be clarified and it is also necessary to know the effect of the correction of propagation direction to the frequency temperature characteristic. If the good temperature characteristic of the crystal ST cut plate is maintained even if the fine adjustment of frequency is conducted, it can be understood that the issue (ii) is solved at once.

Based on such viewpoints, this report evaluated the relationship among phase speed of surface wave and frequency temperature characteristic near the crystal ST cut plate, cutting angle, and in-plane rotation angle, including effects of metal film on electrode consisting a transducer, theoretically and experimentally.

As a result, it is found that the adjustment of frequency is possible without impairing the temperature characteristic when a minute correction is made to the propagation direction, and that slowing of the phase speed and shifting of the peak temperature to lower side in the frequency temperature characteristic by the load effect of electrode, thus the prospect for the optimal designing for devices are gained.

Fig. 7

An example of the frequency temperature characteristic

Changes of frequency $\Delta f/f$ (ppm)

Temperature T ($^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8

Dependency of peak T_p to cutting angle

Peak temperature T_p ($^{\circ}\text{C}$)

Cutting angle θ (degree)

Fig. 9

Dependency of peak temperature T_p to in-plane rotation angle

Peak temperature T_p ($^{\circ}\text{C}$)

In-plane angle $|\varphi|$ (degree)

Fig. 10

Dependency of peak temperature T_p to film thickness

Normalized film thickness kH

Peak temperature T_p ($^{\circ}\text{C}$)

3.3 Frequency temperature characteristic

The effect of the cutting angle θ , in-plane rotation angle ϕ and metal film thickness kH to the frequency temperature characteristic will be described. Within the range of θ , ϕ and kH used in this analysis, $\Delta f/f$, changes of frequency at the temperature T , are shown as quadratic curves (changes of frequency is -10 ppm when the temperature change is about $\pm 15^\circ\text{C}$), and no significant change is observed. However, because the peak temperature T_p , shown in the Fig.7, will be changed by the parameters of θ , ϕ and kH , a description is given with the viewpoint to this relation.

Fig.8 and Fig.9 show dependency of peak temperature T_p to cutting angle and to in-plane rotation angle when $kH = 0$. T_p decreases with respect to the increase of θ , and increases gradually with respect to the increase of ϕ .

Fig.10 shows the relationship between T_p and kH with several parameters of θ when a metal film on electrode exists. With the increase of kH , T_p shifts to the lower temperature side in linearly, and the shift amount for "Al on Quartz" is -8°C for the increase of 0.01 of kH , and for "Au on Quartz", -40°C for the increase of 0.01 of kH . It is clearly understood that the latter case has a significant effect compared to the former case.

Fig. 15

Dependency of peak temperature T_p to in-plane rotation angle

(Comparison with measured value)

Peak temperature T_p (°C)

In-plane angle φ (degree)

Calculated value

Measured value

Fig. 16

Dependency of peak temperature T_p to film thickness

(Comparison with measured value)

Normalized film thickness kH

Peak temperature T_p (°C)

Calculated value

Measured value

4.2 Frequency temperature characteristic

With the same sample used for the measurement of the phase speed, actual measurement of the frequency temperature characteristic was conducted and compared with the calculated values. The result shows that almost same quadratic curves are obtained for all samples, excluding the calculated value of Fig.7 and the position of the peak temperature T_p . Therefore, by focusing the attention only to the peak temperature T_p , dependency to film thickness, cutting angle, and in-plane rotation angle are summarized, and the comparison with the calculated values are shown in Fig.15 and 16.

From these results, it is understood that the tendency of the measured values and the calculated values is very uniform, although the absolute difference of 5-10°C exists between the two cases. The reason of the absolute difference may be attributed to the physical constant used for the analysis.